

港灣設計에 있어서 하이브리드 要素法의 應用에 關한 研究

—釜山港 三段階 開發計劃을 中心으로—

李 重 雨*

A Study on Application of the Hybrid Element Method in Harbor Design

—Under the Third Development Plan for Pusan Harbor—

Joong-Woo Lee

目 次	
Abstract	3. 釜山港에의 適用例
1. 序 論	4. 結 論
2. 數值모델理論	參考文獻

Keywords : hybrid element(하이브리드 요소), bottom friction(해저마찰), boundary absorption(경계면 흡수), symmetric banded matrix(대칭밴드 매트릭스), variational method(변분법), functional (범함수)

Abstract

A very large scale model is developed for calculating the transformation of waves over the bathymetry of a bay or harbor. The accuracy and applicability of the model are demonstrated for harbor design. The method used is the hybrid element method for monochromatic waves under the effects of bottom friction and boundary absorption is introduced to the model.

The model is applied to a real harbor, the Pusan Harbor, Korea, in order to analyze changing wave characteristics due to the construction of new shore structures.

The numerical results indicate that some resonance patterns within the selected wave frequency band. Moreover, the predicted waves at or near resonance without inclusion of the bottom friction and boundary absorption cause the high amplification and thus, unfavorable results in engineering design.

* 正會員, 韓國海洋大學 港灣·運送工學科 教授

1. 序 論

새로운 港灣設計나 기존의 港灣을 보완하고 향상시키기 위한 계획등에 필수적이라고 할 수 있는 분야는 의도하는 構造物을 설치하기전과 후에 있어서 만과 항에서의 入射波에 대한 反應을 예측하는 것이다. 따라서 이에 대한 문제를 더욱 효과적으로 해결하기 위해서는 工學的인 分析에 걸맞는 최선의 방법을 개발하는 것이 요구되며 또한 이를 개선하는데 노력과 투자를 아끼지 않아야 할 것이다. 특히 정확하고 효과적인 波浪의 變化에 관한 모델은 解析의 일 수도 있고 水理 모델(Hydraulic Model)이나 數值모델(Numerical Model)일 수도 있지만 서로 長短點을 지니고 있고 또한 대규모의 비용과 영구적인 시설물 설치, 나아가서는 자연환경의 변경이라는 관점에서 工事前에 충분한 分析과 檢討가 필요하므로 신중한 결정을 내려야 한다.

본 연구의 목적은 可變水深 港灣海域에서 波浪의 傳播와 變換에 대한 數值的 豫測으로 기존의 類似 數值모델에서 제외시킨 海底摩擦이나 境界面에서 波의 吸收등을 도입하고 특히 數值모델領域을 변환하지 않고 開放水路(open channel) 효과를 그대로 살릴 수 있는 방안을 제시하여 이를 실제 港灣에 적용한 예를 보여 設計者에게 중요한 자료를 제시함에 있다.

어떠한 波浪의 變換모델도 그 기본이 되는 波理論이 있다. 그 중 緩傾斜方程式(Mild Slope Equation)도 一般線型波理論의 한 분야로 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이후 Chen과 Mei(1974, 1975)에 의해 有限要素法(Finite Element Method)과 하이브리드 要素法(Hybrid Element Method)으로 방법이 제안되어 많은 학자들에 의해 개량되어 왔다. 이 式 자체로 淺水効果(shoaling), 回折 및 屈折과 反射등의 物理現狀을 포함하므로 數值解析에 빈번하게 사용되고 있으나 海底摩擦, 境界面 吸收, 反射波의 放射(scattering)등을 고려한 경우는 최근에 와서이고 그나마 이들 조건을 종합화한 시도는 Chen(1985, 1986)과 Lee(1987, 1989)등이 있었다. 그러나, Chen(1986)의 경우 境界面에서 吸收에 대한 기술은 예로 든 港

灣境界面에 동일한 反射係數를 설정하여 작은 축적의 港에만 적용할 수 있었고 또한 Lee(1989)의 연구에 의하면 摩擦係數에 대한 것은 실제 港灣과 같은 대규모 港의 分析에는 부적합한 것으로 나타났다. 한편 港灣이나 海岸 특정지역에 대한 시뮬레이션에 수반되는 문제는 방파제나 수로등에서 研究領域을 한정할 때 境界面에 대한 처리로, 數值解析의 결과에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있어서 이에 대한 적절한 처리방법이 아쉬운 실정이었다.

본 연구에서는 이러한 점을 보완하고 數值解析의 精度를 높이기 위해 有限要素法과 解析의인 방법을 접목한 하이브리드 要素法을 사용하여 基本方程式과 境界條件을 처리하고 유도된 모델을 통하여 관점이 되고 있는 釜山港 第三段階 開發海域에 대해 시뮬레이션하여 문제점을 도출해 보고자 한다.

2. 數值모델理論

앞에서 기술한 바와 같이 波浪의 分析을 위해 緩傾斜方程式을 많이 사용하고 있는데 본 計算에서는 海底摩擦을 考察한 修正된 Helmholtz方程式即, 變換된 緩傾斜方程式(Transformed mild slope equation) 式(1)을 使用하고 Fig.1과 같은 問題領域에서 그 境界值條件으로 式(2)-式(5)를 使用하기로 한다.

$$\nabla \cdot (\lambda C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서

∇ : 水平方向 gradient 연산자

C_g : 波의 群速度

C : 波速, $C^2 = g/k \tanh kh$

h : 水深 $h(x, y)$

g : 地球의 重力加速度

k : 波數 $(2\pi/L)$

ω : 波의 角周波數 $(2\pi/T)$

ϕ : 2次元 複素速度포텐셜函數, $\phi(x, y)$

海底摩擦 factor λ 는 해저면에서 Shear Stress

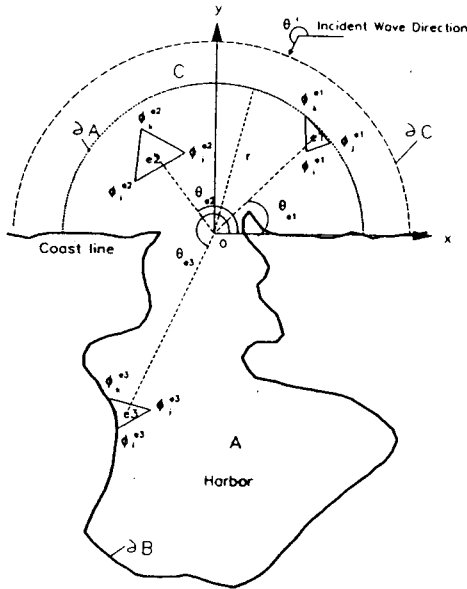


Fig. 1 Definition Sketch of the Finite Element Solution Region(A) and Analytical Solution Region(C)

성분을 海底에서 수평방향의 最大流速에 비례한다고 가정하여 다음 式(2)와 같이 정리할 수 있는데 여기서 β 는 地域에 따라 變하는 無次元의 係數, α_0 入射波의 波振幅, γ 는 波와 海底摩擦사이의 位相差(phase difference)이다.

$$\lambda = \frac{1}{1 + i \frac{\beta \alpha_0 e^{\gamma y}}{h \sinh kh}} \dots\dots\dots (2)$$

그 例로 $\beta=0$ 이면 $\lambda=1$ 로 方程式(1)은 海底摩擦이 포함되지 않은 緩傾斜 波浪式이 된다. 여기서 適用하게되는 港灣水域을 Fig.1과 같이 任意形狀과 可變水深을 導入한다고 할때 섬, 海邊, 防波堤, 埠頭 등 境界面에서의 垂直方向에 대한 流速이 存在함을 反射係數(Reflection Coefficient, K_r)을 使用하여 나타내면 境界面을 따라 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \Gamma \phi \dots\dots\dots (3)$$

여기서 $\Gamma = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r}$ 이다.

海底摩擦係數 β 와 유사하게 係數 $\Gamma=0$ 일 때, 即, $K_r=1$ 로 境界面에서 完全反射할 경우는 式(3)이 一般적으로 數值모델에서의 境界條件처럼 境界面에서 流體速度의 垂直成分, $\partial \phi / \partial n$ 은 0이 됨을 알 수 있다. 또한 水路나 防波堤와의 gap에 대해서는 水理모델 경우처럼 Wave Absorber를 使用할 必要없이 $K_r=0$ 으로 됨으로써 같은 效果를 얻을 수 있다. 이에 대한 검정은 Lee(1989)의 모델 test에서 상술된 바 있다.

傳統的인 有限要素法(Finite Element Method, FEM)에 의한 副振動에의 接近은 必要水域을 三角形 또는 四角形의 要素로 나누고 이를 解析하고 있는데 Fig.1에서 ∂A 와 유사한 境界面의 處理問題가 심각하게 대두되어 이 境界面의 設定範圍와 境界面에서의 再反射가 數值解析의 結果를 變化시키는 事例가 많다. 또한 이를 피하기 위해 넓은 水域의 開放境界面의 導入은 相對적으로 컴퓨터의 記憶容量(memory size)과 計算問題의 擴大라는 問題를 야기하고 있다. 이러한 問題點을 극복하기 위해 본 하이브리드要素法에서는 必要水域을 内部有限區間(A)과 外部無限區間(C)의 두 區間으로 나누고 A區間에서는 三角要素(Triangular Element)로 可變水深에 線形函數를 適用하고 C區間에서는 하나의 極大要素(Super Element)만을 使用하여 一定水深에 解析의 解(Analytic Solution)를 Shape函數로 導入한다. 즉, 離散解(Discrete Solution)와 解析解를 混合한 形態의 解析으로 하이브리드要素法의 그 意義를 갖게 된다. 이때 放射條件(Radiation Condition)이 外部無限區間に 適用되어 이 區間에서 外部로 向하는 波(Scattered Wave, ϕ^s)는 無限距離에서 소멸되어 反射해 돌아오는 波가 없어진다. 이는 式(4)와 같이 Sommerfeld의 放射條件으로 表現된다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi^s = 0 \dots\dots\dots (4)$$

여기서 r 은 極座標界의 距離를 나타낸다.

그 외에 A, C 두 區間的 境界面, 即 開放境界 ∂A 에서의 連續條件을 導入하여

$$\left(CC_g \frac{\partial \phi_A}{\partial n_A} \right) = \left(CC_g \frac{\partial \phi_C}{\partial n_A} \right) \dots\dots\dots (5)$$

이것으로 식(1)의 基本方程式을 포함한 完全한 境界値問題의 形態를 갖춘 셈이 된다. 上記의 모든 境界條件式 (2)–(5)를 만족시키며 식(1)을 풀이하는 것은 一般의으로 困難한데 여기서는 有限要素法에서의 變分法(Variational Method)을 사용하여 그 汎函數(Functional) $F(\phi)$ 가 一定하도록 즉, 境界條件式들을 汎函數에 加해서 이 汎函數를 最少로 하도록 하는 形態로 變換한다.

이에 따라 最終 最少化할 汎函數는 Green의 第1의 同一性의 原理 및 Gauss定理에 의해 境界條件式을 포함시키면 積分方程式의 形態로 다음 식(6)과 같이된다.

$$\begin{aligned}
 F(\phi) = & \left[\int_A \frac{1}{2} \left\{ \lambda CC_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi^2 \right\} dA \right] I_1 \\
 & + \left[\int_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda CC_g (\phi_C - \phi') \frac{\partial (\phi_C - \phi')}{\partial n_A} ds \right] I_2 \\
 & - \left[\int_{\partial B} \frac{1}{2} \lambda CC_g \Gamma \phi^2 ds \right] I_3 \\
 & - \left[\int_{\partial A} \lambda CC_g \phi_A \frac{\partial (\phi_C - \phi')}{\partial n_A} ds \right] I_4 \\
 & - \left[\int_{\partial A} \lambda CC_g \phi_A \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \right] I_5 \\
 & - \left[\int_{\partial A} \lambda CC_g \phi' \frac{\partial (\phi_C - \phi')}{\partial n_A} ds \right] I_6 \\
 & - \left[\int_{\partial A} \lambda CC_g \phi' \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \right] I_7 \\
 & \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

여기서 ϕ' 는 入射波의 複素速度포텐셜이고 ϕ_A , ϕ_C 는 각각 A 및 C區間에서의 複素速度포텐셜을 가리킨다.

식(6)에 HEM에 의한 變換過程을 거치면 一般的인 形態의 代數方程式(Algebraic Equation)로 간략화하여 表現할 수 있다.

海岸 境界 및 港灣構造物 주위에서 波浪에너지의 부분적인 吸收를 境界要素(boundary element)에서 처리하기 위하여 強體構造에서 다루는 熱傳達 問題와 유사한 접근방법을 도입하여 Fig.2와

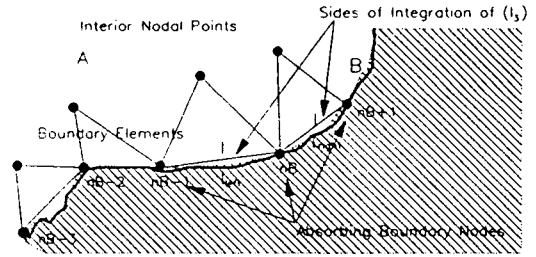


Fig. 2 Conceptual Diagram of Absorbing Boundary Integration

같은 海岸 境界地域에서 식(6)의 세번째 積分項 I_3 을 境界node n_B 에서의 포텐셜에 대하여 第1變分(first variation)을 행하면 식(7)과 같이 된다.

$$\frac{\partial I_3}{\partial \phi_{nB}} = - \left[\int_{\partial B} N_{nB} \lambda CC_g \Gamma \phi_{nB} ds \right] \dots\dots\dots (7)$$

여기서 N_{nB} 는 境界node에서의 形狀函數(shape function)를 나타낸다. 식(7)을 두개의 境界로 나누고 이를 數值積分形態로 정리하면 식(8)이 되는데 이때 l_{left} 및 l_{right} 는 n_B node前後 境界要素의 海岸境界面을, 그리고 B는 境界要素의 수를 가리킨다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial I_3}{\partial \phi_{nB}} = & - \sum_{nB=1}^{B-1} \left\{ l_{left} \frac{(\lambda CC_g \Gamma)_{nB}}{6} (\phi_{nB-1} + 2\phi_{nB}) \right. \\
 & \left. + l_{right} \frac{(\lambda CC_g \Gamma)_{nB}}{6} (2\phi_{nB} + \phi_{nB+1}) \right\} \\
 & \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

식(8)에 의해 계산된 값은 變換後의 剛性 매트릭스 [K]에 포함되고 積分項 I_5 및 I_6 은 load vector Q_1 , Q_2 에 해당하므로 불변으로 變分시 사라진다. 따라서 유도한 汎函數(6)을 두 미지계수 ϕ 와 μ 에 대한 미분을 구하고 이를 각각 0으로 두면 식(9)과 (10)으로 되는데 여기서 E는 전체 node 수를 가리키고 m은 Hankel 函數의 係數에 대한 차수를 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 0, \quad (i=1, 2, \dots, E) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \mu_j} = 0, \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (10)$$

미분한 결과를 연립으로 두고 계수항 { }를 제거하면 식(11)로 정리될 수 있다.

$$([K_1] - [K_4][K_2]^{-1}[K_4]^T)\{\phi\} = \{Q_1\} - [K_4][K_2]^{-1}\{Q_2\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

이때 $[K_1]$, $[K_2]$, $[K_4]$ 는 汎函數 (6)에서 각 積分項 (1, 2, 4)에 대한 매트릭스를 나타내는데 이를 代數 方程式 형태로 요약하면 식(10)과 같다.

$$[K]\{\phi\} = \{Q\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

여기서 $[K]$ 는 剛性매트릭스(Stiffness Matrix)로 對稱밴드형 매트릭스(Banded Symmetric Matrix)이기 때문에 Fig. 2와 같이 上位 한부분만을 計算에 使用하여 記憶容量을 줄일 수 있다. 이 때 $\{Q\}$ 는 Load Vector를 나타내고 식(10)은 Gauss消去法(Gaussian Elimination)에 의해 그 解를 구할 수 있다. 이 複素速度포텐셜의 解는 增幅率과 대응하는 週期로 2, 3次元的인 表現으로 정리할 수 있다.

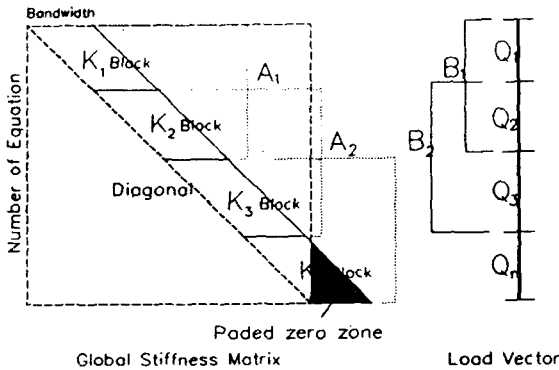


Fig. 3 Dynamic Block Gauss Algorithm for the Upper Banded Matrix $[K]$ and $\{Q\}$

3. 釜山港에의 適用例

모델의 有效性 검사를 위해 이미 여러 경우를 적용하여 기존 모델이나 실험결과와 비교하여 높은 精度를 나타내 보인 바 있다(Lee, 1989). 여기

서는 이 모델을 釜山港에 적용하여 본 것을 소개하기로 하고 특히 Lee(1989)에서 지정한 바와 같이 海底摩擦 β 를 수정하여 0.05로 항만의 반응곡선을 살펴보기로 한다. 부산북외항의 경우는 그 규모로 보아 대략 4.5km x 2.5km로 水深이 10-25m로 緩慢하게 변하고 있고 北內港에 이르는 水路는 13m以上으로 유지하고 있다. 廣範圍한 港灣水域으로 이 港에 대한 여러 共振mode를 計算하는 시뮬레이션은 방대한 컴퓨터 사용시간의 제약 때문에 앞으로의 研究課題로 돌리고 여기에서는 特定周波數範圍와 選擇된 週期에 대한 海面의 패턴을 나타내 보이는 것으로 한다.

釜山北外港의 適用限界는 Fig. 4로 하고 이 港에 대한 波의 方向別 海面에 패턴을 보기 위해 釜山港 第3段階開發事業에 따른 波浪解析調查報告書(1984b) 및 其他 觀測報告書에 의한 有意波의 方向을 分析하여 N50°E와 S10°W 方向이 主를 이룸을 알 수 있었다. 또한 태풍의 時期에는 ESE의 方向에서도 강한 파가 빈번히 발생하고 있어서 Fig. 5의 세방향에 대해 數值모델을 시뮬레이션하였다. 港의 水深은 Fig. 6에서 보는 바와 같고 Fig. 7은 使用된 三角形의 mesh를 나타내고 있다.

Fig. 8에서 Fig. 12는 海底摩擦을 無視하고 海岸에서 構造物에 따른 反射率의 變化만으로 週期 30초의 波에 대한 S10°W 方向에서의 海面의 패턴을 보이는데 垂直軸은 增幅率을 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9는 海안 境界面에서 완전반사가 일어난다고 가정하였을 때 각각 내항 방파제 사이의 gap을 차단한 상태와 開放水路 效果를 도입한 상태를 나타내는 데 북외항 방파제 주위와 매립지 (1), (2)에서 증폭율이 1/2이하로 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에서 Fig. 12는 $K_r=0.98, 0.9, 0.8$ 로 하였을 때 그 增幅率이 상당히 減少하고 있어서 海岸構造物 및 海邊의 吸收率을 考慮하지 않은 一般的 數值모델에는 前述한 바 대로 過大하게 豫測될 수 있음을 시사하고 있다.

또한 Fig. 13에서 Fig. 15는 각각 N50°E, ESE, S10°W 方向에 海面패턴으로 方向別 比較를 알 수 있는데 Fig. 13은 한때 海運 港灣廳에서 석탄부두 예정지로 고려한 兪호동 부두와 潮島 및 南防波

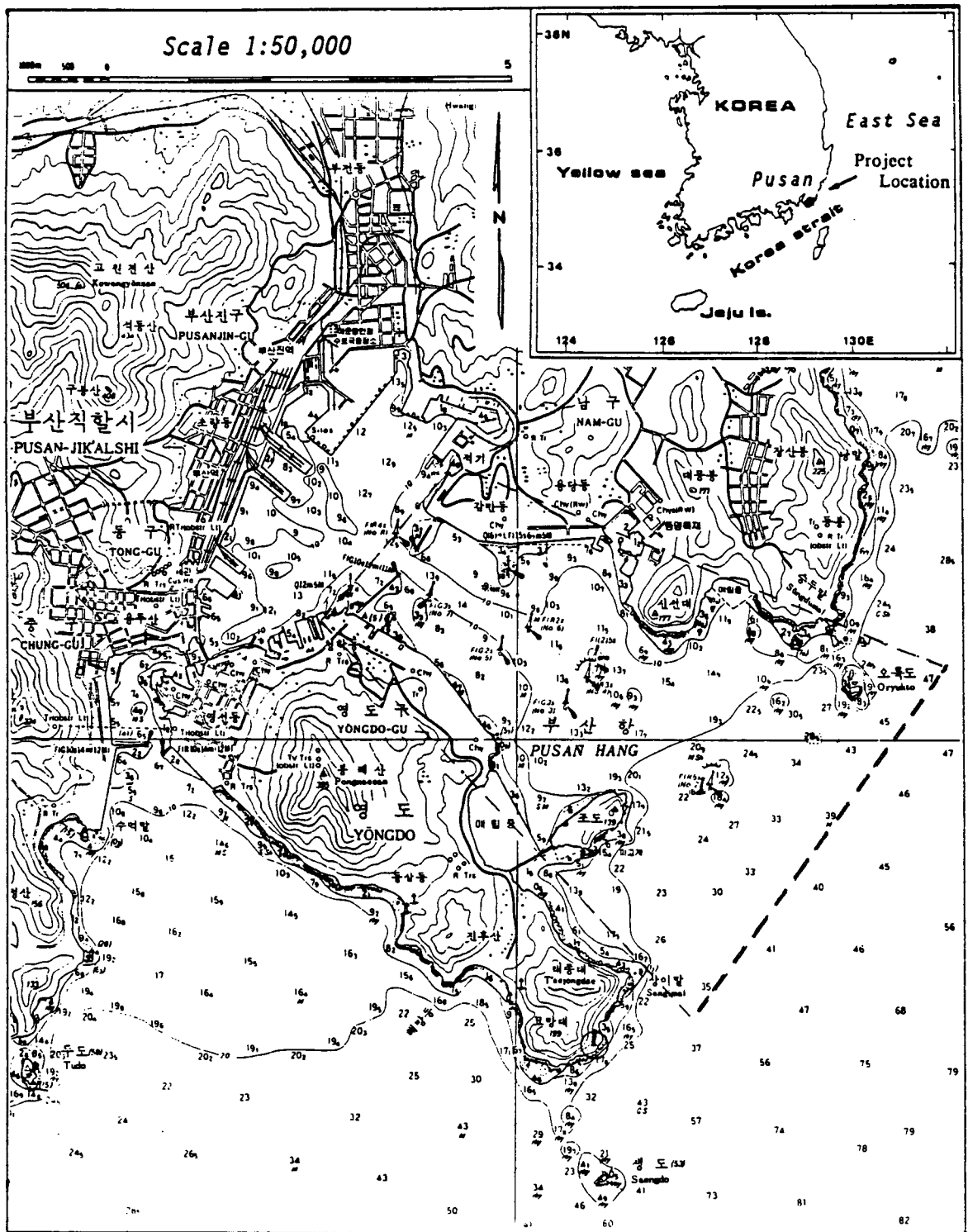


Fig. 4 Location and Limits of Numerical Model

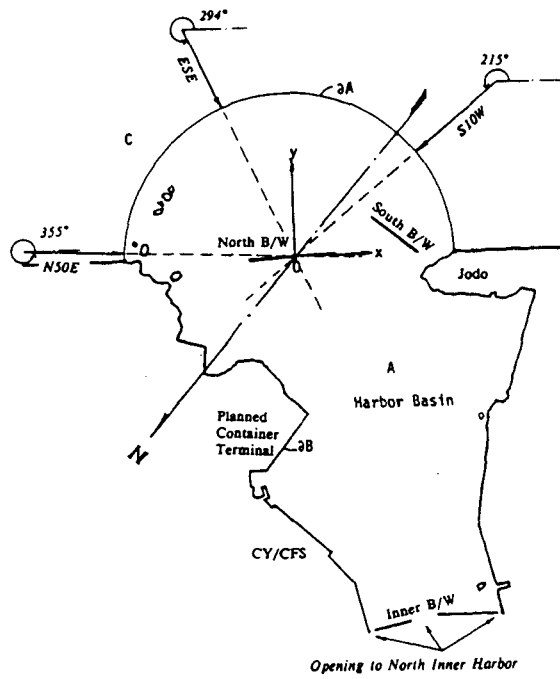


Fig. 5 Definition Sketch of the Coordinate System for Pusan Harbor and the Predominant Three Wave Directions

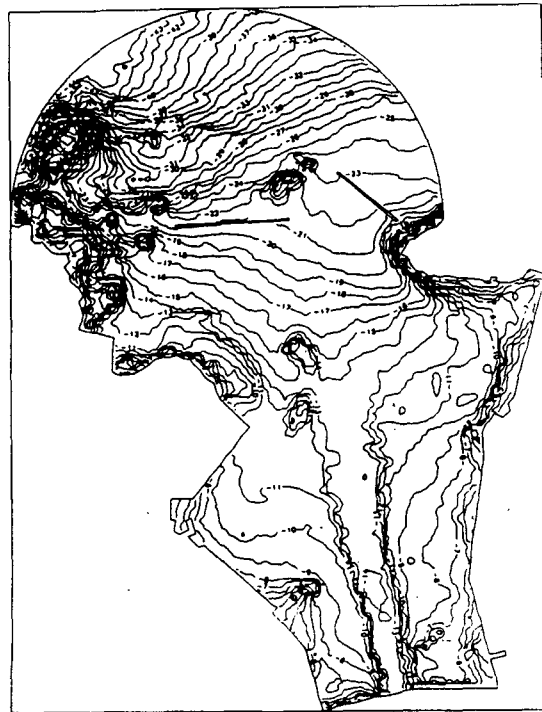


Fig. 6 Bathymetry of Pusan Harbor



Fig. 7 Discretization of Pusan Harbor with Triangular Elements(4356 nodes and 8356 elements)

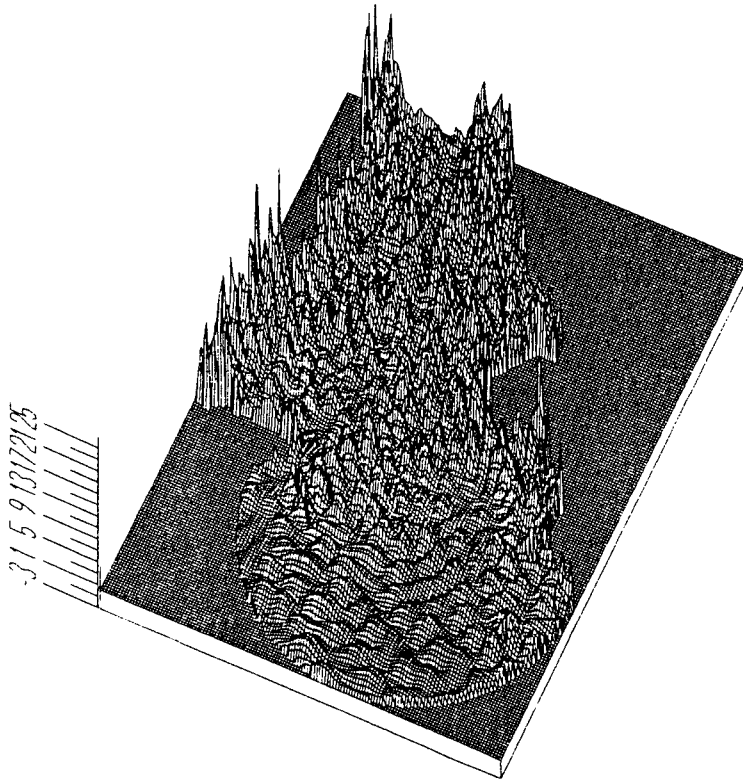


Fig. 8 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=1.0$, $\beta=0.0$, closed end)

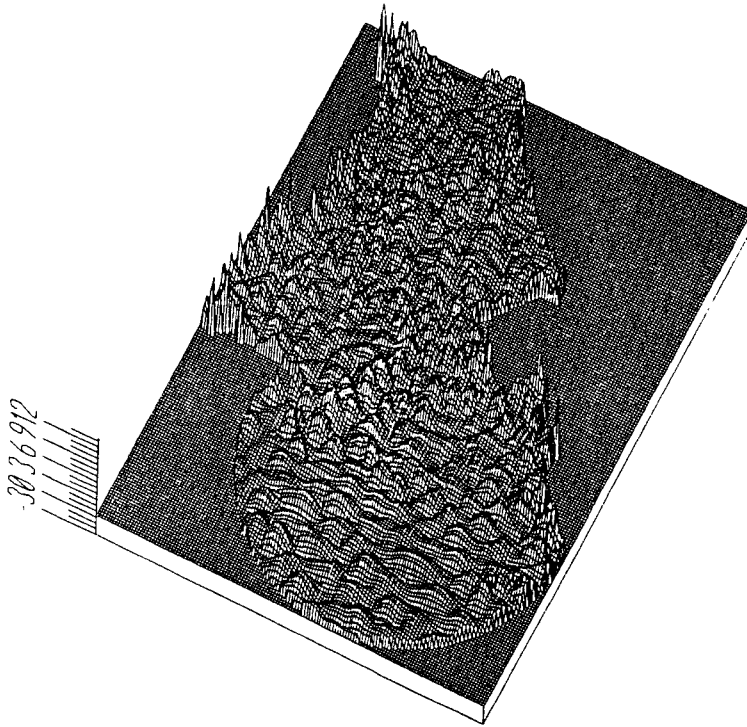


Fig. 9 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=1.0$, $\beta=0.0$, open end)

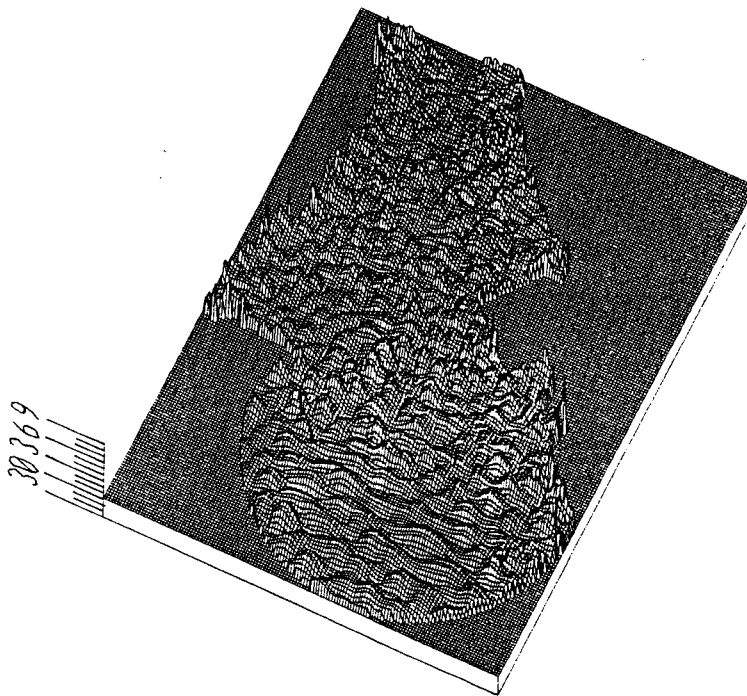


Fig. 10 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=0.98$, $\beta=0.0$, open end)



Fig. 11 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)



Fig. 12 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=0.8$, $\beta=0.0$, open end)

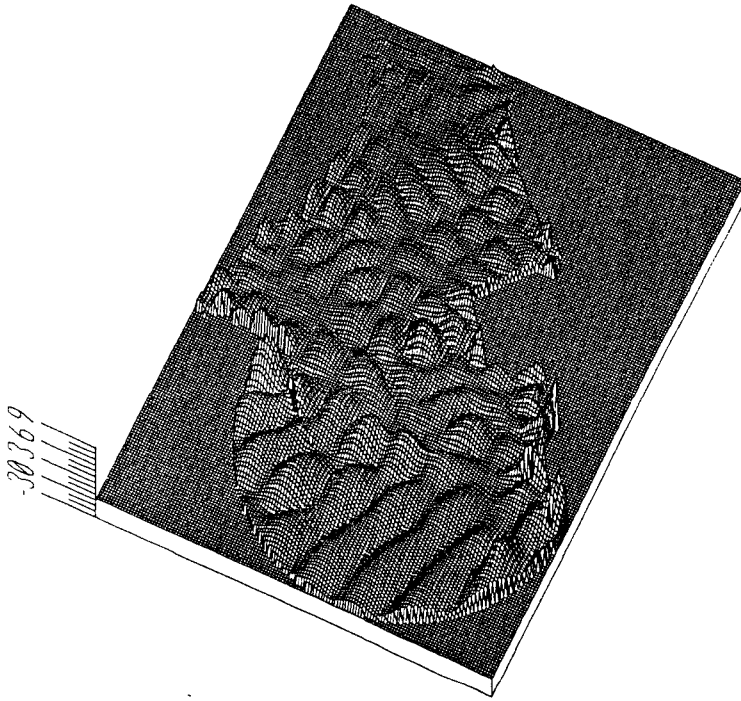


Fig. 13 Surface Pattern for Pusan Harbor (60sec, N50°E direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)

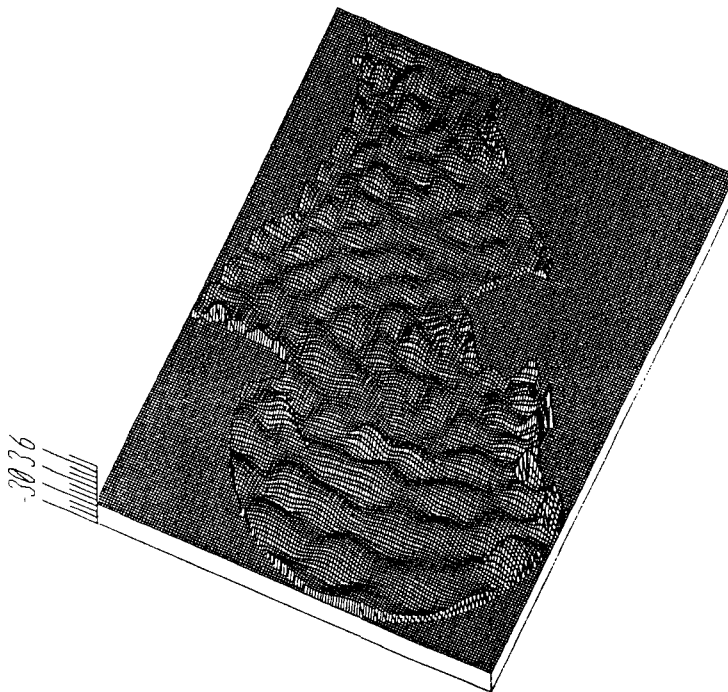


Fig. 14 Surface Pattern for Pusan Harbor (60sec, ESE direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)

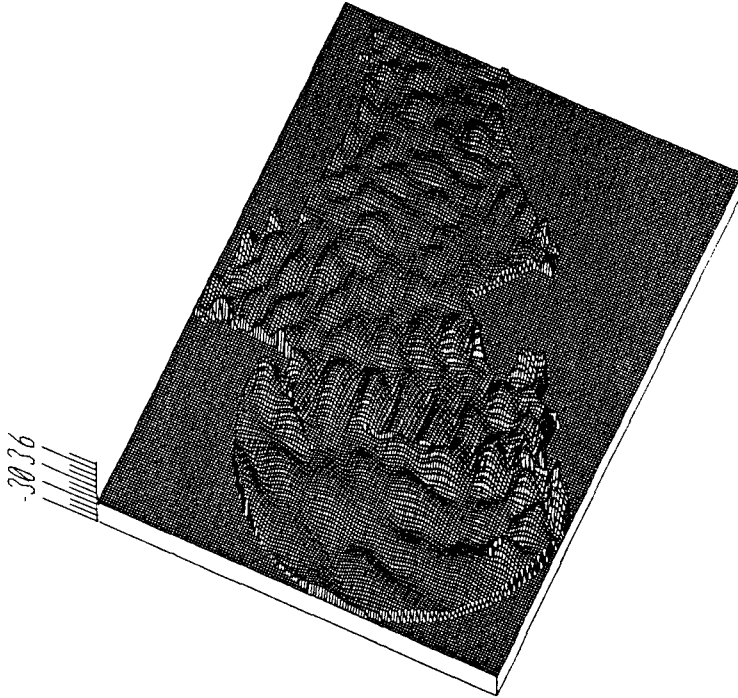


Fig. 15 Surface Pattern for Pusan Harbor (60sec, S10°W direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)

堤사이에서의 正常波(Standing wave)패턴의 橫方向共振mode를 보여주고 있다. 이 海域은 다른 시뮬레이션을 통한 結果로도 立證이 되어 매립지 (1) 지역을 埠頭로 利用하기 위해서는 앞으로 있을 제4단계개발사업의 수행 과정 중에서 港灣設計形態를 修正하여 이를 보완 할 必要가 있음을 알 수 있다.

入射波에 대한 方向別 增幅率은 Fig. 16에서와 같이 12個의 조사점을 정해서 그 例로 20初에서 94初의 周波數帶 中20初-60初를 1初 間隔으로 하여 41種類의 波를, 60初-94初를 2初 間격으로 하여 17종류의 파를 選擇하여 총 58종류의 파에 대한 항만의 反應을 시뮬레이션하였다. 이때 海岸 및 構造物에 대한 反射率을 각 境界요소에 대해 기초자료 조사 및 현장 답사를 기초로 하여 달리 적용하였고 海底摩擦을 考慮하였으며 시뮬레이션한 結果는 Fig. 17-Fig. 20에 나타난 바와 같다.

그림에서 나타난 增幅率의 Curve는 海底摩擦係數 β 를 0.05로 수정하여 선택하였는데 이전의 연구(Lee, 1989)보다 높은 反應곡선을 나타내고 있

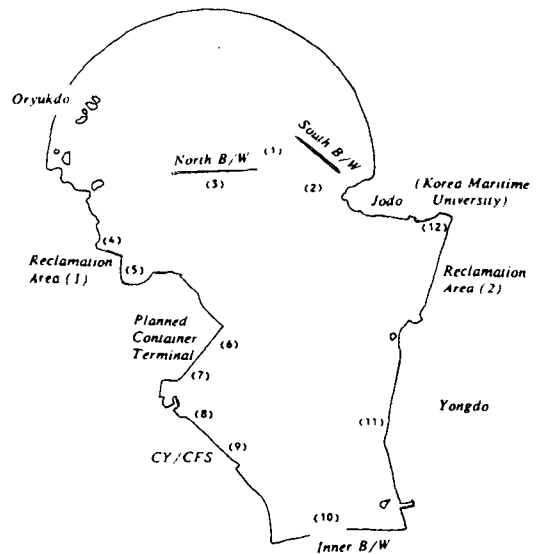


Fig. 16 Location and Station Number for Wave Amplification and Horizontal Velocities

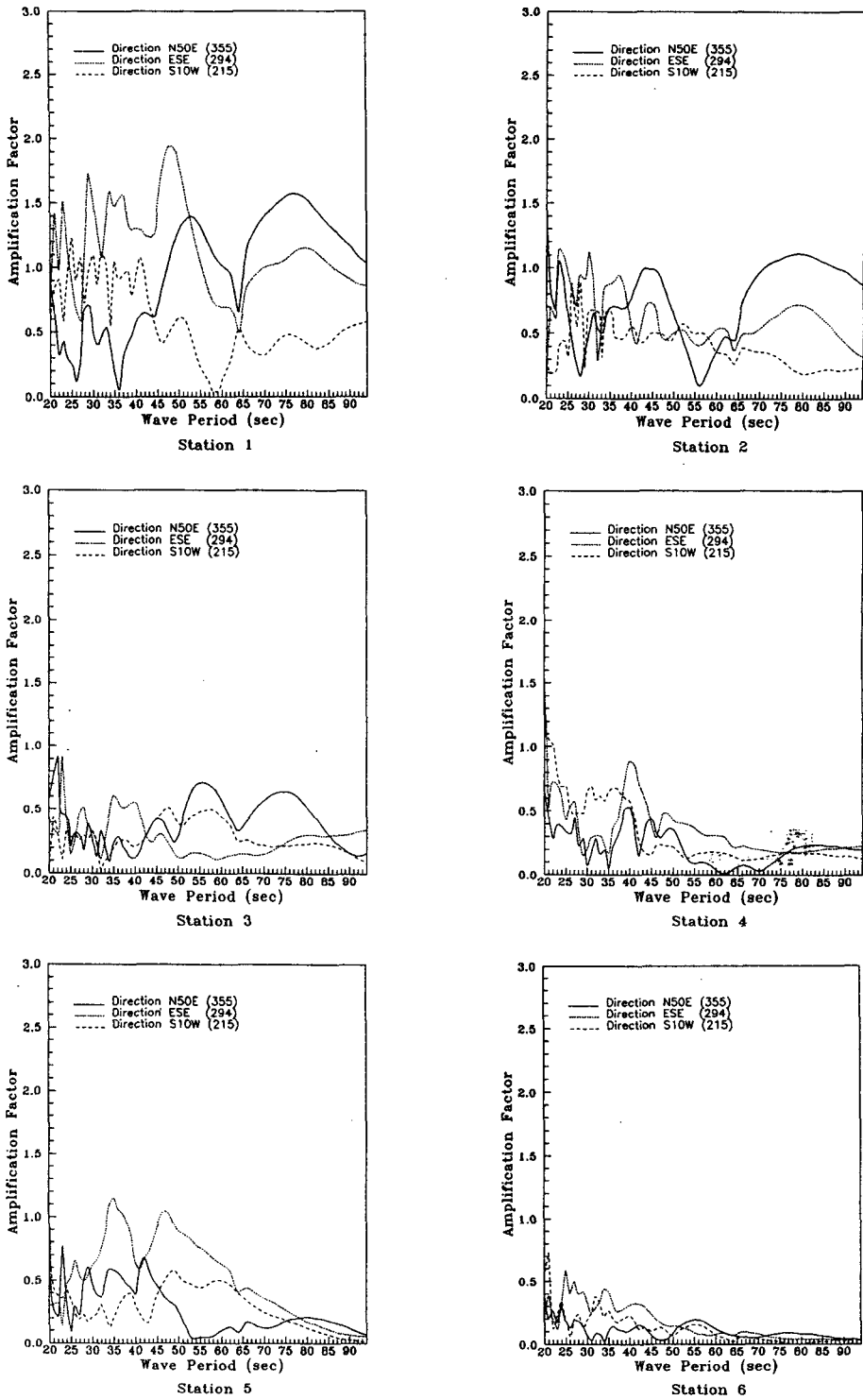


Fig. 17 Frequency Response Curves at Stations 1, 2, 3, 4, 5, 6 (Wave Height Amplification Factor with $K_r = 0.8 \sim 0.98$, $\beta = 0.05$, open end)

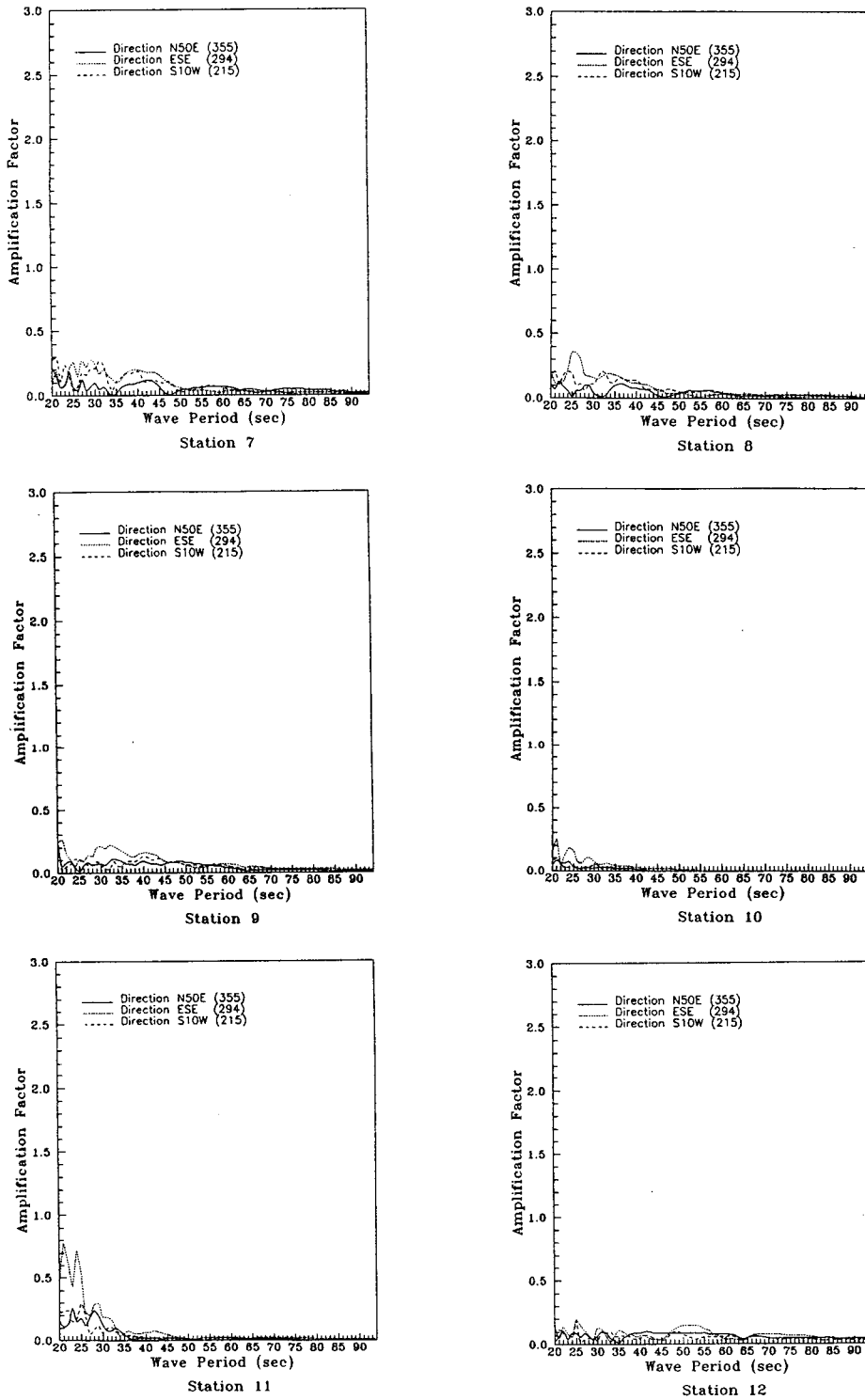


Fig. 18 Frequency Response Curves at Stations 7, 8, 9, 10, 11, 12 (Wave Height Amplification Factor with $K_r=0.8\sim0.98$, $\beta=0.05$, open end)

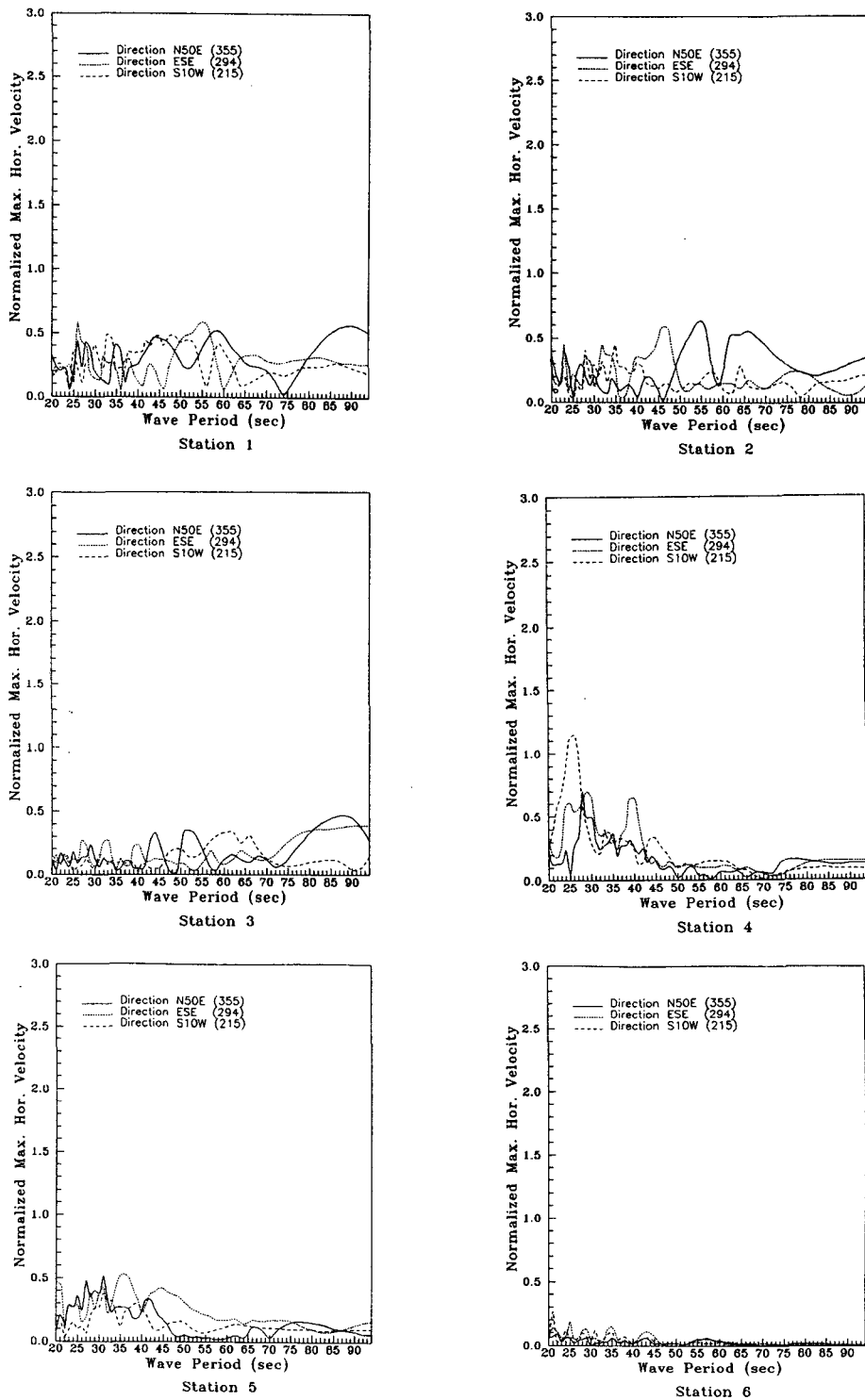


Fig. 19 Frequency Response Curves at Stations 1, 2, 3, 4, 5, 6 (Normalized Maximum Horizontal Velocity with $K_r=0.8\sim 0.98$, $\beta=0.05$, open end)

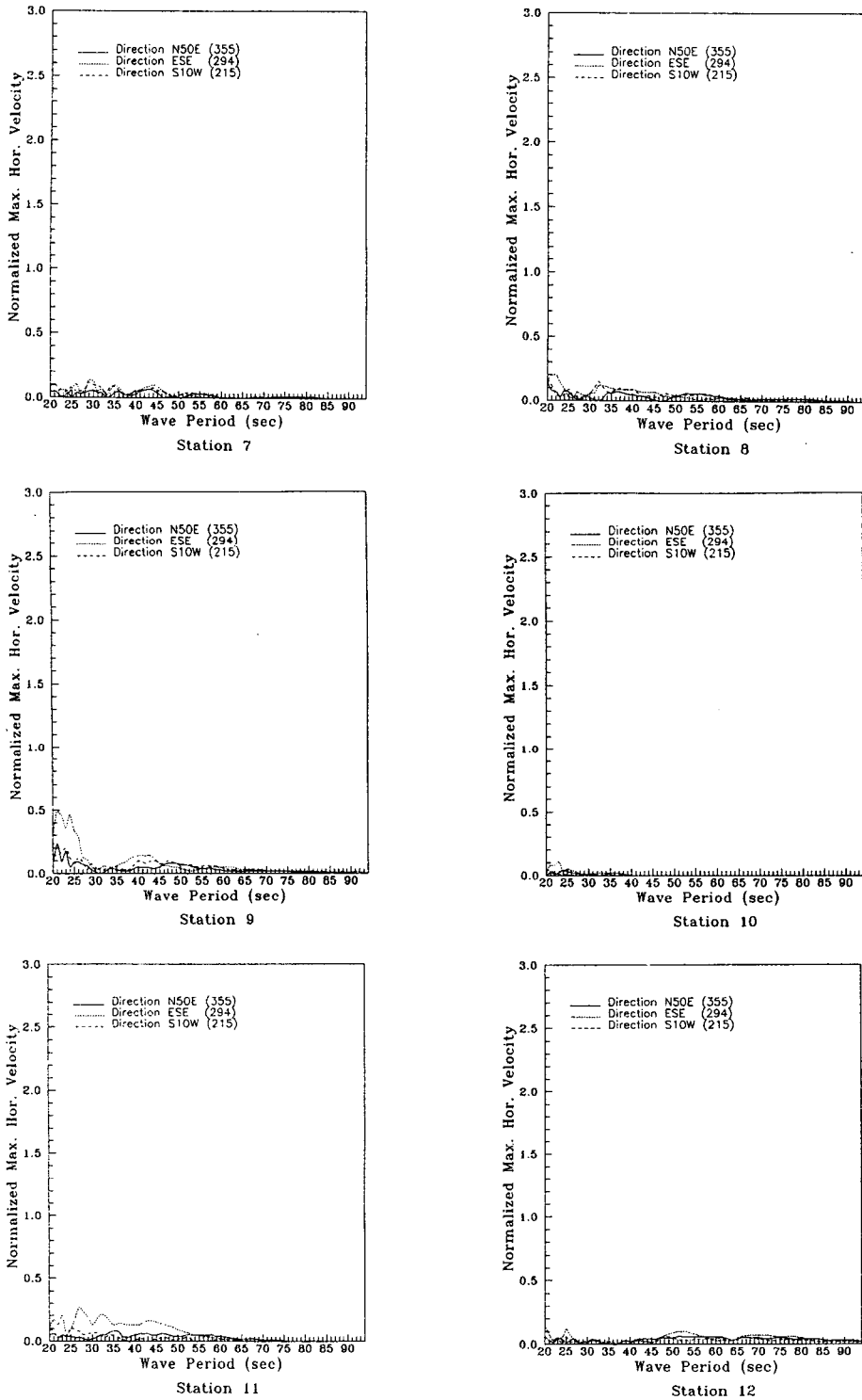


Fig. 20 Frequency Response Curves at Stations 7, 8, 9, 10, 11, 12 (Normalized Maximum Horizontal Velocity with $K_r=0.8\sim 0.98$, $\beta=0.05$, open end)

으며 새로 부가된 장주기파의 밴드중 75초 전후의 주기에 대해 다른 부진동 현상이 나타나고 있어서 앞으로 보다 광범위한 주파수 밴드의 長週期波에 대한 시뮬레이션이 요청되고 있다. 여기서 나타난 傾向은 이전의 시뮬레이션에서 보인 바와 같이 ESE 方向의 波가 조사점 (4)를 제외한 모든 區間에서 강한 應答을 나타내고 조사점(4)에서는 短週期에서 강한 應答을 보이고 있다. 이는 ESE 方向 39초이하 週期の 波가 ‘오륙도’ 및 ‘승두말’ 부근 섬들의 체인으로 遮斷 및 回折되나 S10°W 方向은 集積되어 조사점 (4) 주위에서 增幅效果가 커진 것으로 보인다.

그러나 이러한 경향은 새로 도입한 周波數 밴드에서 세기가 N50°E, ESE, S10°W 순으로 변화를 보이고 있는데 이는 ‘오륙도’를 비롯한 섬들이 더이상 遮斷 또는 回折에 큰 영향을 미치지 않음을 나타내는 것으로 장주기파에 대한 더 많은 실험이 필요함을 뒷받침한다.

Fig. 19와 Fig. 20은 각조사점에서 파의 水平方向速度成分을 나타낸 것인데 각 有限 要素의 중앙에서의 속도성분에 대해 入射波의 振幅을 나누어 標準化한 것을 가리킨다. 따라서 절대속도성분을 구하기 위해서는 현지 입사파의 진폭을 구한 값에 곱하면 된다. 증폭을 곡선과 같이 수평방향 속도 성분도 조사점 (4)와 (5)에서 단주기파에 대해 비교적 높은 반응을 일으켜 항만 설계시 이를 점검할 필요가 있다고 본다.

전반적으로 보아 새로 예정한 컨테이너 터미널 부근의 海域은 안정하여 이를 이용하는 데는 무리가 따르지 않을 것으로 보나 Fig. 10에서 Fig. 15가 시사하는 바와 같이 釜山 北外港 入口海域과 北外港 防波堤 주위의 海域은 파로 인하여 입출항하는 선박에서의 조선상에 어려움을 가중시킬 것으로 보며 이는 이미 이 수역을 통과해 본 中·大型船의 船長, 導船士 및 航海士들이 지적하고 있다.

Fig. 21는 標準化한 수평방향의 속도성분을 표시한 예이고 Fig. 22는 이중 한 부분만을 확대하여 표시한 것이다.

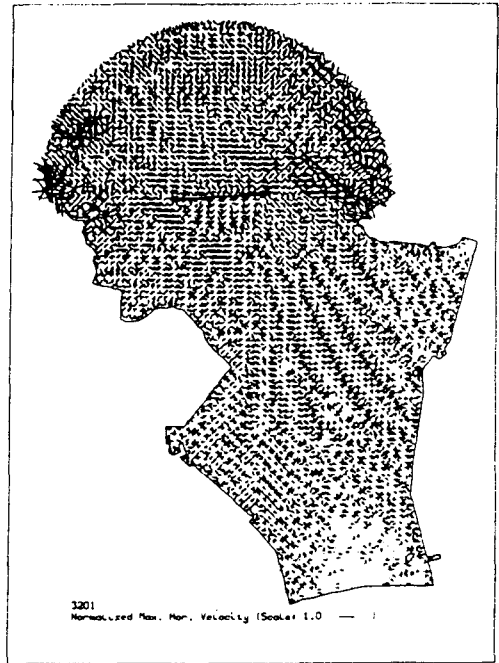


Fig. 21 Normalized Maximum Horizontal Velocity Pattern for 20sec Wave

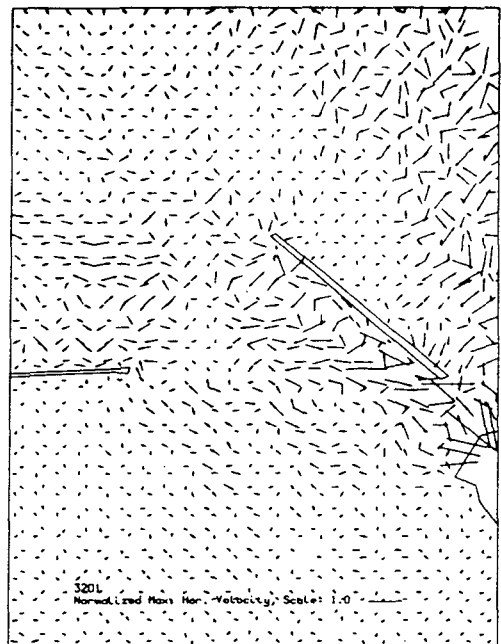


Fig. 22 The Local Horizontal Velocity Profile for 20sec Wave

4. 結 論

以上은 外港으로부터 港灣의 固有振動 週期에 해당하는 長週期小振幅波의 進入에 따른 海面의 應答를 數値모델을 통해 밝히기 위한 한 段階로 釜山의 北外港을 대상으로 하여 特定 週期波 밴드에 대해 計算해 본 것이다. 이는 새로운 항만 설계나 기존의 항만을 보완하기 위한 계획을 수립할 때 수치모델의 이용을 나타내 보인 것으로 기존의 모델보다 합리적으로 접근하고 있음을 알 수 있다. 여기서 지적된 문제점들을 포함한 것에 대해서는 現地의 觀測結果로 檢證해 나가야 하고 실제 발견된 부분에 대해서는 항만계획을 실행해 나가는 단계에서 수정해 가지 않으면 안 될 것으로 사료된다. 또한 反射係數나 摩擦係數와 같은 파라메타들은 觀測 및 부분적인 水理實驗 結果의 分析을 통해서 도입될 때 비로소 그 精度가 확립된다고 하겠다. 물론 본 수치모델에서 사용하고 있는 파라메타의 범위는 이미 여러실험과 관측으로 얻어진 것을 토대로 하고 있으므로 일반적으로 이용이 가능하나 대규모의 컴퓨터사용과 사용시간의 방대성 때문에 선택한 周波數 밴드 이상으로 시뮬레이션은 행하지 못하였다. 今後에는 長週期에 대한 각 港의 應答를 觀測과 數値시뮬레이션을 통해 계속적으로 研究할 必要가 있으며 앞으로 합리적인 국토개발과 이용은 물론 자연재해 방지면에서도 국가적인 차원에서 港灣設計에 대한 과감한 研究費의 投資가 수반되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

강시환, 이동영, 이중우 등(1989), "연안방재 시설의 설계기준 산출연구(Ⅰ)," 한국 과학기술원 해양연구소 BSPG 00076-230-2.
한국종합기술개발공사, 일본테트라포드주식회사 등(1984a), "부산항 제3단계 개발사업 수리모형실험 보고서".
한국종합기술개발공사, 일본테트라포드주식회사 등(1984b), "부산항 제3단계 개발사업 파랑해석

조사 보고서".

Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (1964), "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, National Bureau of Standards", Applied Mathematics Series 55.
Behrendt, L. and Jonsson, I. G. (1984), "The Physical Basis of the Mild-slope Wave Equation", Coastal Engineering, pp. 941-954.
Berkhoff, J. C. W. (1972), "Computation of Combined Refraction-Diffraction", Proc. 13th. Coastal Engng. Conf., Vancouver 1972, ASCE, Vol. 1, pp. 471-490.
Berkhoff, J. C. W. (1974), "Linear Wave Propagation Problems and the Finite Element Method", Int. Sym. on Finite Element Methods in Flow Problems, Swansea.
Chen, H. S. and Mei, C. C. (1974), "Oscillations and Wave Forces in a Man-made Harbor in the Open Sea", Proceeding of 10th Naval Hydrodynamics Symposium, June 1974, pp. 573-596.
Chen, H. S. (1984), "Calculation of Water Wave Scattering with Friction", Proceeding of 5th DMD Specialty Conference, ASCE, August 1984, pp. 716-719.
Chen, H. S. (1986), "Effects of Bottom Friction and Boundary Absorption on Water Wave Scattering", Applied Ocean Research, Vol. 8, No. 2, pp. 99-104.
Harms, V. W. (1975), "Diffraction of Water Waves by Cylindrical Structures of Arbitrary Shape", Hydraulic Engineering Laboratory Report No. HEL 1-23, University of California at Berkeley, CA.
Houston, J. R. (1981), "Combined Refraction and Diffraction of Short Waves using the Finite Element Method", Appl. Ocean Res., Vol. 3, No. 4, pp. 163-170.
Houston, J. R. and Outlaw, D. G. (1978), "Long Wave Simulations using a Finite Element Model", Proceedings of the 2nd International Conference

on Finite Elements in Water Resources.

Ippen, A. T. and Goda, Y. (1963), "Wave Induced Oscillations in Harbours ; The Solution for a Rectangular Harbor connected to the Open Sea", Hydro. Lab., Massachusetts Institute of Technology.

Jonsson, I. G., Skovgaard, O., and Brink-Kjaer, O. (1976), "Diffraction and Refraction Calculations for Waves Incident of an Island", J. Marine Research, Vol. 34, No. 3, pp. 469-496.

Lee, J. J. and Raichlen, F. (1971), "Wave Induced Oscillations in Harbors with Connected Basins",

W. M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, CIT, Rept. No. KH-R-26.

Lee, J. W. (1987), "Application of the Hybrid Element Method to Water Waves near Absorbing Shore Structures", Department of Ocean Engineering, University of Hawaii (Internal Report)

Lee, J. W. (1989), "Hybrid Element Analysis of Water Waves for harbor Design", Ph. D. Dissert., Department of Ocean Engineering, University of Hawaii.

Mei, C. C. (1983), "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves", John Wiley & Sons.